基于 APROS 的核农耦合系统的仿真分析

刘维理[1]，顾先青[2]，王震[1]，刘伟华[1]，王晨晨[2]，冯芹芹[2]，徐英虎[2]，程会方[2]

1. 山东核电有限公司，烟台，265116
2. 上海核工程研究设计院股份有限公司，上海，200233

摘要：为缓解气候变暖和实现 3060 双碳目标，国家优化产业和能源结构，推动煤炭清洁高效利用，大力发展新能源，在确保安全的前提下积极有序发展核电。相较于传统化石能源，核电更清洁、环保、低耗。然后，实际核电站热效率只有约 33%，其余热量排放到环境中，造成严重浪费。其中，温排水排放到临近海域，热量对水体环境造成热影响。因此，高效利用温排水余热不仅可以提高核电站能源利用率，还能减少对水体环境的热污染，有助于节能减排。本文采用 APROS 软件对一套核电余热用于温室大棚和室内海水养殖的增温提产综合系统进行仿真分析，论证核农耦合系统的可行性，为我国核能余热综合利用提供科学依据。

关键词：温排水；节能减排；APROS ；核农耦合

中图分类号：

DOI：

Simulation study on simulation analysis of nuclear power and agricultural coupling system by APROS

LIU Weili[1], GU Xianqing[2], LIU Weihua[1], WANG Zhen[1], Wang Chenchen[2], FENG Qinqin[2], Xuyinghu[2],Cheng huifang[2]

1. Shangdong nuclear power company LTD., Yantai, 265116, China
2. Shanghai nuclear engineering research & design institute CO. LTD., Shanghai, 200233, China

Abstract：In order to mitigate climate warming and achieve the 3060 goal, the state optimizes the industrial and energy structure. The efficient and clean utilization of coal is promoted and new energy is vigorously developed. On the premise of ensuring safety, nuclear power is actively and orderly expanded. Compared with traditional fossil energy, nuclear power has the advantage of clean, environmental protection and low consumption. However, the actual thermal efficiency of nuclear power plant is only about 33%. The rest heat is discharged into the environment, resulting in serious waste. Among them, the thermal discharge is discharged into the adjacent sea area and its heat has a thermal impact on the water environment. Therefore, the efficient utilization of thermal discharge residual heat can not only improve the energy utilization rate of nuclear power plants, but also reduce the thermal pollution to the water environment, which is conductive to energy conservation and emission reduction. In this paper, APROS software is used to simulate and analyze a comprehensive system for increasing temperature and production of greenhouse and indoor marine culture by using nuclear residual heat. The possibility of nuclear power and agricultural coupling system is demonstrated, which provides a scientific basis for the comprehensive utilization of nuclear residual heat in China.

Key words: Thermal discharge, energy-saving and emission-reduction, APROS, nuclear power and agricultural coupling

为了应对全球气候变化和环境污染带来的挑战，实现经济可持续发展，2020年中国首次向全球宣布，中国二氧化碳排放要力争2030年前达到峰值，努力争取在2060年前实现碳中和。同时，“十四五”规划纲要中也指出，完善能源消费总量和强度双控制度，重点控制化石能源消费，优化产业结构和能源结构，推动煤炭清洁高效利用，大力发展新能源，在确保

第一作者：刘维理（1989—），男，现主要从事核能领域研究，E-mail: liuweili@spic.com.cn
通信作者：wangchenchen，E-mail：wangchenchen@snerdi.com.cn
收稿日期：2024-06

安全的前提下积极有序发展核电。

目前，核电站的大量余热在多数情况下没有被有效利用，不仅造成了能源的浪费，甚至可能对附近环境造成不利影响[1-5]。国内外针对温排水的余热利用展开了一系列研究[6-13]。王银爽[10]建立了二维水动力书写模型，研究了流速和潮位对电厂温排水的流场和温度场的变化规律。於凡[11]等分析了核电站循环冷却水对环境的影响，对采用热泵回收低品位能源的展开了研究。上述研究表明对温排水再利用可提高能源利用率。然而，如何有效且高效地回收利用这部分废热仍处在探索阶段。核电站温排水余热利用可分为两种：直接利用和间接利用。其中，直接利用主要应用于种植业和养殖业这两大领域。北方秋冬季节较为寒冷，农作物及水产生物的生长缓慢，经济性较差。将核电站余热用于温室大棚的供热和提高养殖水池温度，不仅提高能源利用率，还改善经济性。

本文针对如何克服北方秋冬季农业生产的低温低产的问题，设计了一套核电余热用于温室大棚和室内海水养殖的增温提产综合系统，利用APROS进行仿真分析，论证核农耦合系统的可行性，为我国核能余热综合利用提供科学依据。

1 核农耦合可行性分析

1.1 北方冬春季节低温对农业生产的限制

在我国的华北、东北、西北地区，农业生产无霜期短，每年从 10 月份到第二年的 5 月份不宜进行种植生产，时间长达半年之久。为了延长生产时间，人们建造了日光温室大棚进行种植、养殖。日光温室大棚种植、养殖给人们的生活带来了极大的变化。但是，大棚在北方高寒地区受气温影响很大，棚内温度低，昼夜温差过大，生产并不尽如人意，特别在寒冷冬季，大棚里就得生火加温，由于热源不稳定，常造成植物生长期长、产量低、品质差，甚至出现农作物被冻死的现象。由此造成了北方地区冬季的蔬菜、水果等农业产品价格较高，影响人们生活水平的提高。

我国北方区域，每年10月之次年4月由于温度较低，露地蔬菜难以生长，近些年来发展温室大棚来提高产量、延长产出期。但是温室大棚存在秋冬季升温难、加热成本高的难题。

北方地区的水产养殖也面临秋冬早春的低温限制难题。农业农村部发布的《2020年全国渔业经济统计公报》显示，全国水产品总产量6549.02万吨，其中，养殖产量与捕捞产量的比例为79.8:20.2，海水产品与淡水产品的产量比例为50.6:49.4。南方区域可以全年采用近海养殖和室内养殖，北方区域冬季低温，室内养殖成本高，产量严重萎缩，影响了我国水产品的供应。

中国北方的渤海和黄海北部，每年都有不同程度的结冰现象。每次冰封或严重冰情都会对渔业生产造成不同程度的影响。烟台地区2018-2020年9月至次年5月间气温和海水温度统计分别如图1和图2所示，用于测算内外温差和增温需要的热量需求。

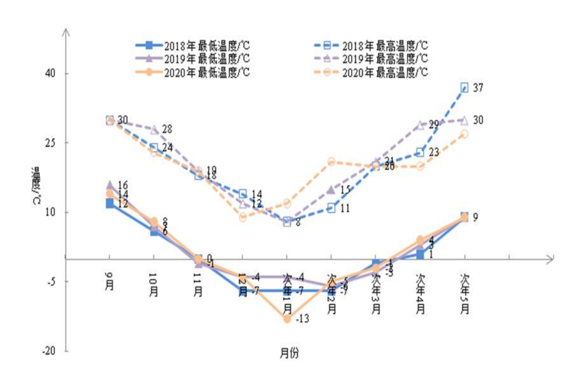


图1. 烟台地区2018-2020年9月至次年5月间气温变化

Fig.1 Variation of air Temperature changes from Sep. to May of the next year in Yantai area from 2018 to 2020

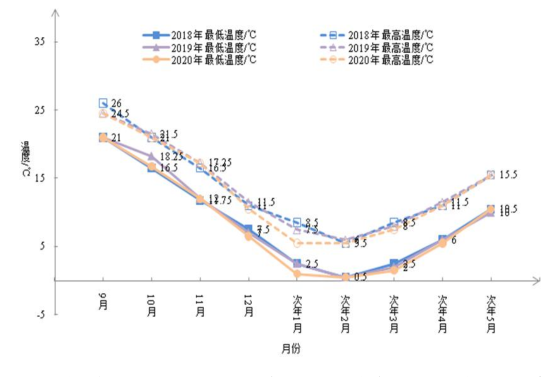


图2. 烟台地区2018-2020年9月至次年5月间海水温度变化

Fig.2 Variation of air Temperature changes from Sep. to May of the next year in Yantai area from 2018 to 2020

1.2 核电厂的余热资源与再利用情况

在我国，核电站多以海水为最终热阱的直流冷却。这一方式下冷却水经过循环，带走热量后又排入到海洋中。通常，此部分排放的循

环冷却水温度高于周围海水温度，又称为温排水。对于一台百万装机的核电机组，每年的温排水量可达到35-60 m^3/s，水温比环境水温高约6-11 ℃。因此，对于现代化的核电厂，排水产生的热量必然会对周围水体生态带来影响。当水体温度增高时，水中含氧量境地，有毒物质毒性增强，水体恶化，对海洋生物的生长发育、新陈代谢都存在影响。

早在上世纪70年代，国际社会对温排水的预热利用问题就已高度关注。常见的对于温排水的利用方式也是集中在农业领域。常见的农业利用途径包括土壤增温、灌溉、温室加热以及海产品养殖等。此外，随着热泵技术的不断发展，将温排水的热品位提高用于供热，食品消毒、干燥，金属去污和处理等领域的研究也随之增多。但多数研究仅停留在实验室规模，而农业领域的应用则发展得相对较为成熟。将温排水的余热来代替化石燃料燃烧释放的热量，明显可提高大棚种植和海水产品养殖的经济性。同时，也缓解了核电站大量排放温排水所带来的热污染影响。

2 APROS的基本数学模型及计算方法

APROS是一个用于工业过程全范围建摸和动态仿真软件，它具有电站热工过程和自动控制系统的设计、安全分析和培训仿真系统开发等功能[14-16]。目前，APROS仿真支撑系统已成功应用于火电、核电和化工领域的仿真模拟。其中，在核电站仿真中通常采用APROS Nuclear这一版本。

应用APROS仿真建模时，整个热力系统网络可抽象为容积模块和支路模块组成的流体网络。整个热力系统计算包是建立在质量、动量、能量以及质分率守衡的基础之上。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t}+\frac{\partial A\rho v}{\partial z}=0 \qquad (1)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial A\rho v}{\partial t}+\frac{\partial A\rho v^2}{\partial z}+\frac{\partial A\rho}{\partial z}=S \qquad (2)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial A\rho h}{\partial t}+\frac{\partial A\rho vh}{\partial z}=S \qquad (3)$$

在求解守衡方程时，将模型看成节点和分支所组成的一个热力计算网络。其中，软件中自带的过程组件模型会自动管理这个网络，从而生成计算级模型及其对应的属性。对于一个热力节点，其主要状态变量是压力、焓以及质分率，则分支上的主要变量为流量。这样可根据压力、焓以及质分率或者其它量，如密度和运动粘度等，可以通过物性函数来计算得到。节点以及分支的状态量会被系统整理成为矩阵方程，方程求解器可以求解大型非线性方程组。基于物理建模的求解方法使得系统能够快速实时的进行仿真计算。

3 核农耦合方案设计

针对北方核电厂的余热存量，结合北方区域秋冬早春（10月-次年4月）的低温限制，如图3所示，设计了一套将核能余热用于温室大棚和室内海水养殖增温提产的综合利用系统。

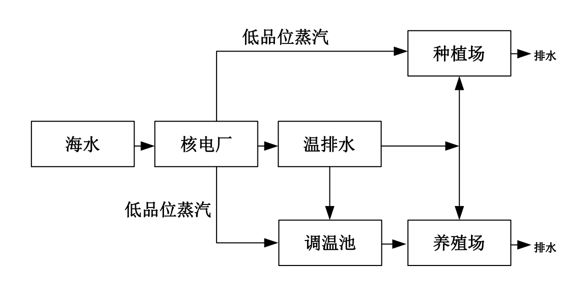


图3 核农耦合系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of nuclear power and agricultural coupling system

本文针对全部采用核电厂温排水作为种植和养殖的热源，和以核电厂温排水为基础同时采用少量低压蒸汽加热温排水提高供水温度的两种方案进行对比分析。

种植方案如表1所示：

表1 核农耦合种植方案

Table 1 The planting scheme of nuclear power and agricultural coupling system

	有土栽培种植方案	种植条件	种植作物
1	只用核电厂温排水	土壤和棚内空气维持在15±5℃	蔬菜
2	利用少量低品位蒸汽对温排水进行再热	土壤和棚内空气温度维持在25-30℃	热带水果

目前国内冬季养殖主要分布在南方区域，

鱼池水温通常维持在3～5℃，如果提高养殖海水温度促进鱼苗快速生长，可获得较高的经济收益，核电厂的温排水一般有20℃左右，可以直接用于养殖大多数经济鱼类，如果对经济性好的鱼类可以考虑利用低品位蒸汽将鱼池加热到25℃，加快鱼类生长，方案如表2所示。

表2 核农耦合养殖方案

Table 2 The fish-farm scheme of nuclear power and agricultural coupling system

	养殖方案	养殖温度	养殖鱼类
1	只用核电厂温排水	20℃	经济鱼类
2	利用少量低品位蒸汽对温排水进行再热	25℃	罗非鱼、竹荚鱼、石斑鱼等

4 APROS仿真分析

利用APROS软件对大棚核农耦合方案进行模拟，其大棚供热模拟系统如图3所示。

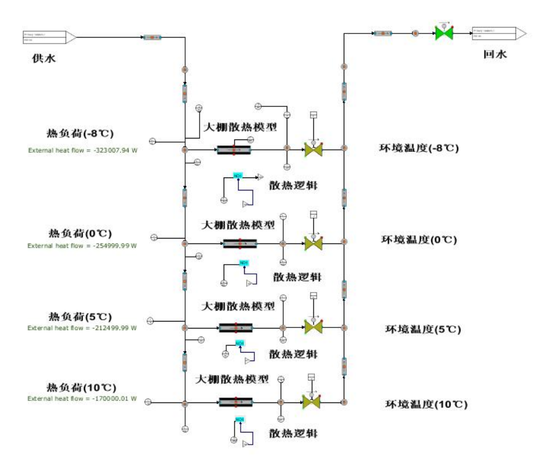


图4 种植大棚APROS仿真分析模型

Fig.4 APROS simulation model of planting

种植以单个大棚为对象，计算条件采用可用面积2000㎡，顶部面积2000㎡，高度6m，双层膜结构，泥土导热系数为0.83w/m·C°，墙体面积438㎡，建筑维护面积2438㎡，种植深度为0.5m，，地下埋管形式，种植地点在温排水取水点5km范围内。种植方案1）只用核电厂温排水进行供热，温排水温度为20℃，只消耗很少的泵输送功，电价按照0.55元/kWh。方案2）以少量低品位蒸汽将大棚温度提升到30℃，参数为0.2MPa，120℃，蒸汽价格按照50元t/h计算，APROS仿真分析结果如表3和表4所示：

表3 方案1分析结果

Table 3 Analysis results of solution No.1

环境温度（℃）	热负荷（kW）	能耗（kW）	月费用（元）
-8	196	5.56	2200
0	127	4.37	1730
5	85	3.65	1444
10	43	2.92	1158

表4 方案2分析结果

Table 4 Analysis results of solution No.2

环境温度（℃）	热负荷（kW）	蒸汽用量（t/h）	月费用（元）
-8	323	0.47	16920
0	254	0.36	12960
5	212	0.32	11520
10	170	0.25	9000

利用APROS软件对养殖鱼池核农耦合方案进行模拟，鱼池供热模拟系统如图4所示。

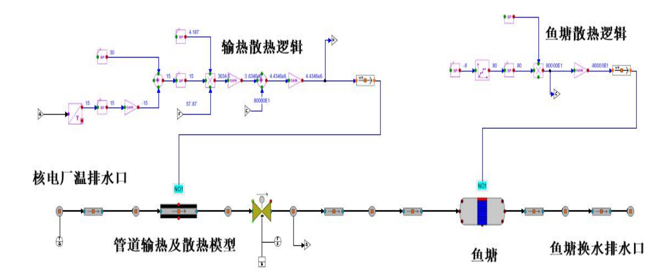


图5 养殖鱼池APROS仿真分析模型

Fig.5 APROS simulation model of fish-farm

养殖以单个养鱼池为对象，规格长×宽×高=100m×50m×2m=10000m³，温排水直供，换水频率 6 天。建模考虑取水耗热量和围护结构散热量。养殖方案 1）只用核电厂温排水用量为 69t/h，温排水考虑为 20℃，利用温排水进行养鱼，只消耗泵的输送功，流量为 69t/h，功率为 6.9kW，按照 0.55 元/kWh 的电价计算，鱼池的温水月费用为 2732 元。方案 2）以温排水热量为基础，再辅以少量低品位蒸汽提升温排水温度，参数为 0.2MPa，120℃，经分析排水热量可以满足自身散热量，只需要 0.53t/h 的蒸汽将鱼池水提温到 25℃，按照 50 元/t 计算，月费用为 1.9 万元。

5 结论

本文分析了利用核能余热对种植大棚和

室内养殖进行加温的核农耦合综合系统，采用APROS进行了仿真计算分析。结果表明充分利用核电厂温排水进行种植、养殖，经营性好，节能明显。这一方式完全具备推广利用的可行性，为核电余热再利用、节能减排的同时，提高北方秋冬早春低温季节的农业生产效率，提供了良好的解决方案。如果核电厂进一步优化运行方式，冬季运行在最佳真空状态，降低循环水泵的厂用电率，实现综合利用工况，温排水可以进一步提高到30℃，无需蒸汽加热就可以满足高档种植和养殖的需求，经济性将会进一步提升。

参考文献：

[1]. 周涛,王泽平.中国核电站节能减排问题研究[J].节能,2009,28(8):6-8.

[2]. 汪安平.近海核电机组冷却和海水综合利用[J].产业与科技论坛,2018,17(7):74-75.

[3]. 葛雄鹰.核电厂温排水环境影响的控制对策初探[J].科技创新导报,2014,(11):68-69.

[4]. 刘永叶,刘森林,陈晓秋等.核电站温排水的热污染控制对策[J].原子能科学技术,2009,43(z1):191-196.

[5]. Yi-Li Chudng, Hsido-Hui Yang, Hsing-Juh Lin. Effects of a thermal discharge from power plant on phytopblank-ton and periphyton in subtropical coastal waters[J]. Journal of Sea Research, 2009,(61):197-205.

[6]. Beall S E, Yarosh M M. Status of waste heat utilization and dual purpose plant projects[R].Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1973:5-33.

[7]. Lanford T E. Ecological effects of thermal discharges[M]. London & New York:Elsevier Applied Science, 1990:345.

[8]. 杨旭,周涛,汝小龙等.核电厂温排水余热综合利用模式研究[J].电力建设,2013,34(6):56-59.

[9]. 石建中,侯平利,胡友情等.核电厂闭式冷却水系统余热回收技术研究[J].核动力工程,2011,32(z2):31-33.

[10]. 王银爽.电厂温排水数值模拟[D].河海大学,2007.

[11]. 於凡,杨东.核电站冷却水余热利用问题的研究初探[J].能源与环境,2009,(2):7-9.

[12]. 王新猛.北方电厂循环水余热利用的可行性分析[J].山东化工,2017,46(10):109-110.

[13]. 程利江，高华喜.核电厂温排水余热综合利用分析[J].教育教学论坛,2015,(6):72-74.

[14]. 赵利刚.基于APROS的核电站加热器建模与仿真[J].能源与节能,2016,(4):90-91,178.

[15]. 晏涛.基于Apros的600MW汽轮机组仿真[D].东南大学,2004.

[16]. 蔡丹.300MW直流锅炉动态特性仿真与建模方法研究[D].东南大学,2007.